

DC-RFハイブリッド熱プラズマ流の非定常3次元数値シミュレーション

著者	茂田 正哉
雑誌名	SENAC : 東北大学大型計算機センター広報
巻	46
号	3
ページ	13-17
発行年	2013-07
URL	http://hdl.handle.net/10097/00124733

[共同研究成果]

DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常 3 次元数値シミュレーション

茂田 正哉

東北大学大学院工学研究科機械システムデザイン工学専攻

本稿では、熱流動場と誘導電磁場の相互作用を考慮した DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常 3 次元数値シミュレーションについて述べる。また熱プラズマと低温流体が共存する 3 次元の熱流動場やコヒーレント構造（渦構造）といった本シミュレーションにより得られた新たな知見を紹介する。

1. 緒言

DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流とは、大気圧下において直流（Direct current; DC）放電による非移行式アークプラズマジェットと高周波（Radio frequency; RF）放電による誘導結合プラズマを組み合わせた高エネルギーのプラズマ流^[1]である。この放電形式によって生成・維持されるプラズマ熱流動の工学的応用への期待は大きく、これまでナノ粒子の大量創製プロセス^{[1][2][3]}やマイクロ粒子群の高速球状化プロセス^[4]などに利用されてきた。しかしながら、熱プラズマ流は 10,000 K を超える高温と強い発光を伴う流体であるため、実験計測は難しく、大小様々なスケールの渦によって構成されているその熱流動場に関する知見は各種プロセスの効率的な制御のために必要不可欠であるにも関わらず、依然として乏しいのが現状である^[5]。それ故に数値シミュレーションによる現象解明に期待が寄せられているものの、熱プラズマ流の数値計算は収束解を得るためにしばしば多大なる労力を必要とするため（次節参照）、特にハイブリッド熱プラズマ流については定常状態および軸対称 2 次元を仮定したものが数例^{[1][2][6]}報告されているのみであった。

そこで本研究では、ハイブリッドプラズマトーチ内における熱プラズマと低温流体が共存する流動場および 3 次元のコヒーレント構造の動的挙動を明らかにすることで熱プラズマの流動現象に関する新たな知見を得ることを目的として、熱流動場と誘導電磁場の相互作用を考慮した DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常 3 次元数値シミュレーションを試みた^[7]。

2. 計算方法

通常の生成・維持条件において、熱プラズマ流の圧力は大気圧と同程度である。ガス種にアルゴンを用いるとすればプラズマを含む流体全域にわたって局所熱平衡が成り立ち、また光学的に薄いと仮定できる。さらに変位電流も無視することができる。このとき質

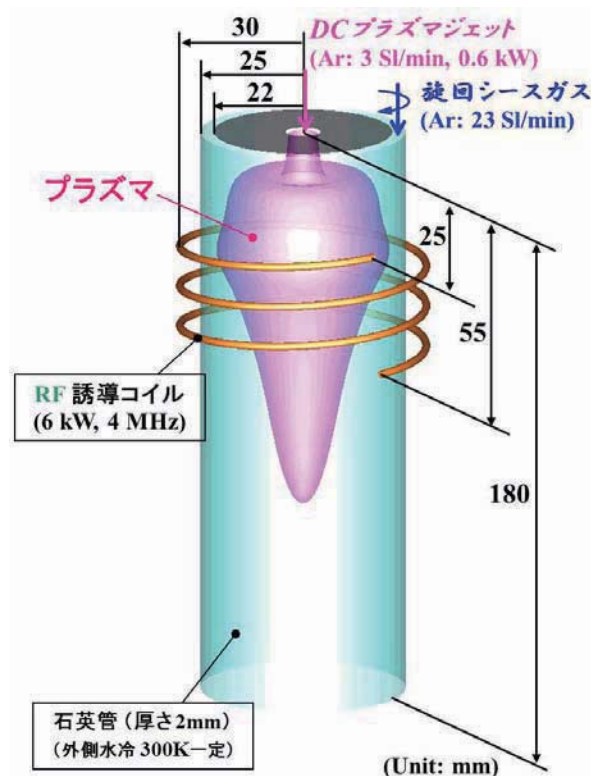


図1 DC-RF ハイブリッド熱プラズマトーチ

量・運動量・エネルギーに関する保存方程式、および誘導電磁場に対する Maxwell の方程式が支配方程式となる。本研究では、流動現象のダイナミクスを捉えるために Large Eddy Simulation (LES) に基づいて数値計算を試みるが、その際 10,000 K を超える高温のプラズマ領域と 300 K の低温ガス流が相互作用しながら同時に存在する流動場を取り扱わなければならない。両者の間には粘性・熱伝導率・定圧比熱・導電率といった物性値に大きな差があり、計算領域の中に局所的に低 Reynolds 数領域と高 Reynolds 数領域が共存することになる。すなわち乱流的な領域と層流的な領域を同時に計算する必要がある。そこで本計算ではサブグリッドスケールにおいてコヒーレント構造モデル⁸⁾を用いた。

さらに熱プラズマ流の数値計算においては、上述の物性値変化のみならず、約 45 倍に及ぶ密度変化を考慮しなければならない。その一方で、流れ場におけるマッハ数は 0.003~0.045 の範囲にあるため、圧縮性流体解析用の計算スキームを用いてしまうと工学的に有意な時間スケールでの流体運動を捉えるためには膨大な計算時間を要することになる。すなわち現実的なアプローチとして、熱プラズマ流を「大きな密度変化を伴う非圧縮性流体」として取り扱うことになるが、このとき数値計算は非常に不安定となる。そのため支配方程式の対流項を 1 次精度上流差分法によって離散化し、その数値粘性効果を利用して少しでも計算を安定化して行うことが多い。しかしながら、数値粘性には同時に渦を潰してしまう効果もあるため、熱プラズマと低温流体が共存する流動場の渦構造を明らかにするという本研究の目的に反してしまう。そこで今回は渦の捕捉に有効な中心差分法の適用を試みるが、この方法は物性値変化も密度変化もない流体解析においてすら計算を不安定にすることがよく知られている。そのためか熱プラズマ流の数値計算において中心差分法を用いたという報告はない。そこで本研究では、渦を捕捉するために 2 次精度中心差分法を適用しながら、計算の破綻を防ぐために 1 次精度上流差分法を 10% 分混ぜるという手法を用いて対流項の離散化を行った。また拡散項や生成項の離散化には通常の 2 次精度中心差分法を用いた。時間微分項には 2 次精度 Adams-Bashforth 法を適用した。全ての計算点において質量・運動量・エネルギーの保存性を満足させるため、計算領域は有限体積法により 2,051,033 個のコントロールボリュームに分割され、誘導電磁場とカップリングしながら PISO 法⁹⁾を用いて熱流動場の計算を行った。

3. 計算条件

図 1 に DC-RF ハイブリッド熱プラズマトーチの概略図を示す。内径 50 mm のトーチの上部に壁面に沿って設けられた幅 3 mm のスリットから 300 K のアルゴンガスがシースガスとして旋回成分を持って注入される。またトーチ上部中心の内径 8 mm のノズルから 12,000 K の DC プラズマジェットが 3 Sl/min で供給される。RF 誘導コイルは半径 30 mm、長さ 30 mm、ピッチ間隔 10 mm のらせん形状をしている。DC 放電および RF 放電に対する投入電力はそれぞれ 0.6 kW および 6.0 kW とし、RF 印加周波数は 4 MHz とした。時間ステップ幅を 0.5 ms とし、初期条件 (time = 0) として軸対称 2 次元の場を計算領域全体に与えた。計算には東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-9 を用いた。

4. 計算結果

図 2 に本計算によって得られた熱流動場の代表的な瞬間像を示す。7,500 K および 10,000 K の等温度面や流速で色付けられた流線から、プラズマトーチ内は複雑で 3 次元的な熱流動場となっており、しばしば仮定される軸対称 2 次元の場とは程遠いものとなっていることがわかる。高温のプラズマ領域には、らせん状の流線が示す再循環流が見られることが多い。これは導電率の高いプラズマ領域に Lorentz 力が発生し、流体運動を駆動するためである。またその再循環流はト

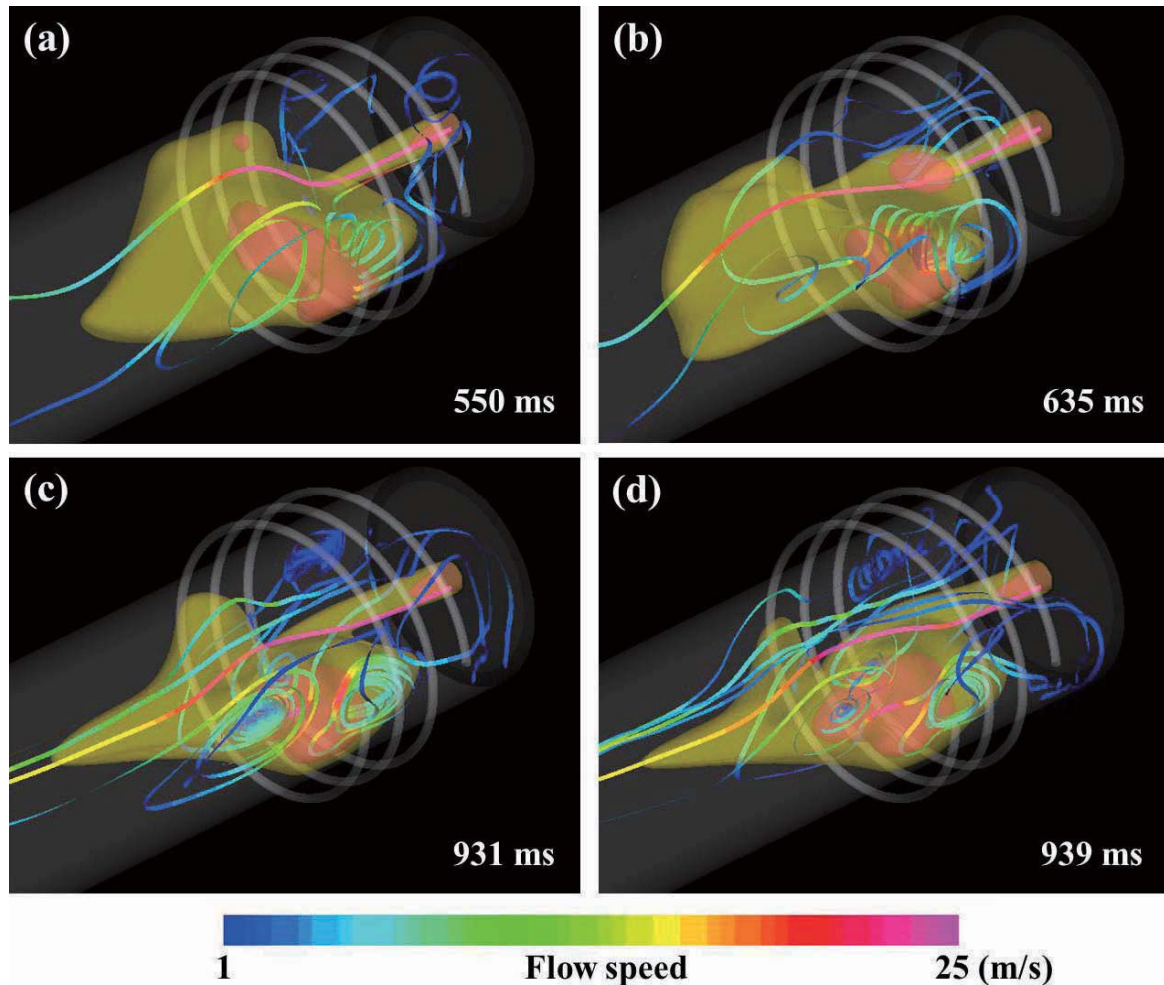


図2 トーチ内の熱流動場(7,500K および 10,000K の等温度面と流速で色付けされた流線)

一チ上部から注入される低温のシースガス流にも影響を与えるため、結果としてトーチ内の熱流動場に片寄りが生じ、直進性の高い DC プラズマジェットも蛇行する。また低温領域における流速は小さく、一方で高温のプラズマ領域における流速は主に大きい。これは低温の気体がプラズマ化して高温になる際に、熱膨張によって体積が増加するためである。

図 3 に速度勾配テンソルの第二不変量 $Q=3$ の等値面によって定義される渦構造を示す。ここで Q は代表速度 10 m/s とトーチ内径によって無次元化されている。高温領域における渦構造は大きく、その一方で低温領域では多数の小さな渦が発生している。高温領域における渦は主にプラズマに働く Lorentz 力に起因するものと考えられる。また高温領域は粘性が高いため、低温領域に生じるような小さな渦は存在できない。小規模もしくは中規模の渦群は 4,000 K 以下の領域に見られるが、これはプラズマ流と低温のガス流との界面付近で生じる流体力学的な不安定性によって発生したものと考えられる。またトーチ上壁付近でも低温の小さな渦群が生じ、プラズマジェット周辺に存在する渦構造に引き込まれて合体する様子も計算されている。

5. 結言

熱流動場と誘導電磁場の相互作用を考慮した DC-RF ハイブリッド熱プラズマ流の非定常 3 次元数値シミュレーションを試み、熱プラズマと低温流体が共存する 3 次元的な熱流動場およびコヒーレント構造を明らかにすることに成功した。詳細は文献[7]を参照されたい。

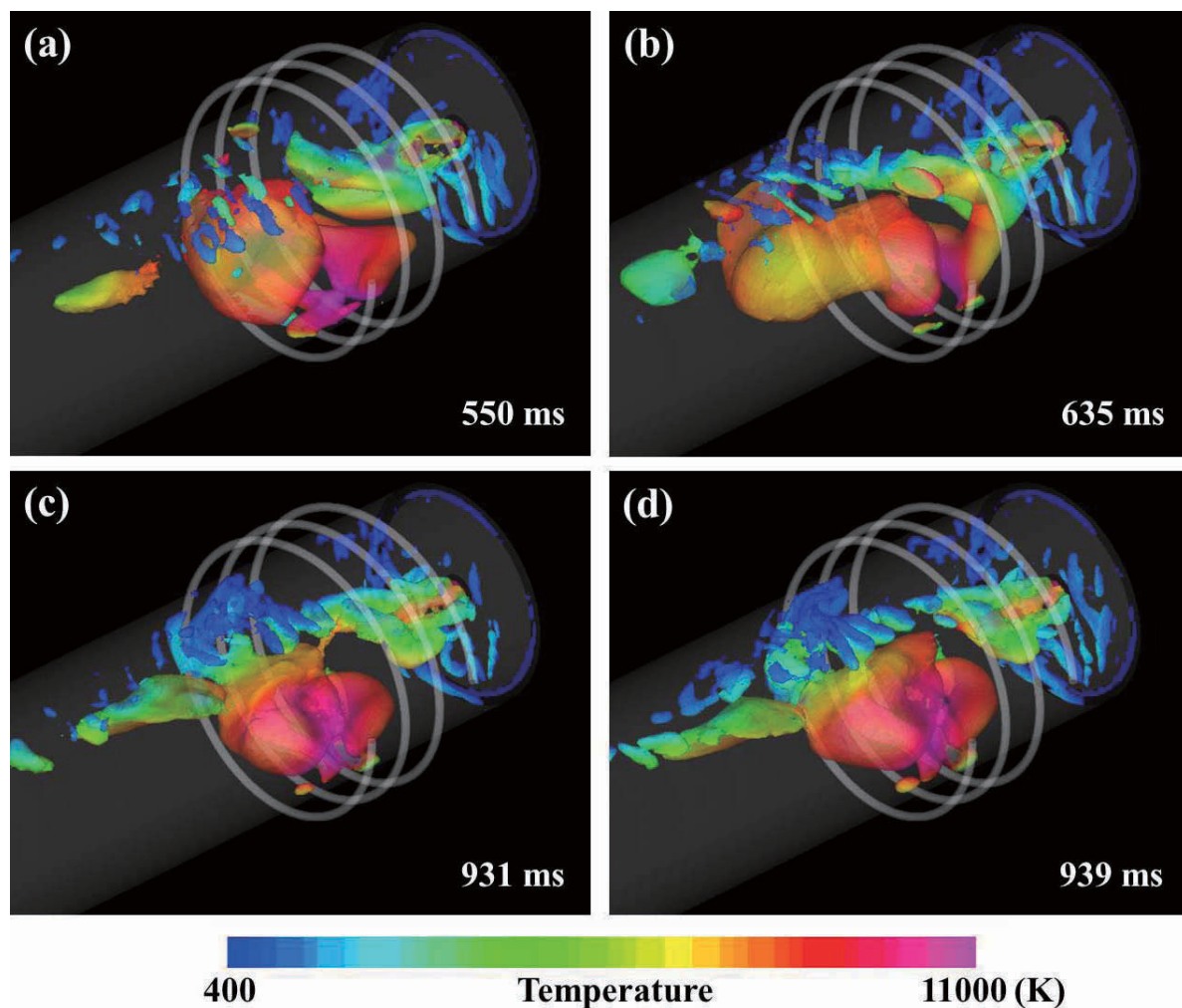


図3 速度勾配テンソルの第二不変量により定義された渦構造

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができ、計算コードの高速化にあたっては同センター関係各位よりご協力をいただきました。また渦構造に関する有益な助言をくださいました東北大学大学院工学研究科の福西祐教授と伊澤精一郎准教授に感謝の意を表します。なお、本研究は学術研究助成基金助成金（基盤研究(C): 23560182）によって行われたものであることをここに記します。

参考文献

- [1] Yoshida T., Tani T., Nishimura H., and Akashi K., “Characterization of a hybrid plasma and its application to a chemical synthesis”, J. Appl. Phys., Vol. 54 (1983), pp. 640-646.
- [2] Shigeta, M. and Nishiyama, H., “Numerical Analysis of Metallic Nanoparticle Synthesis using RF Inductively Coupled Plasma Flows”, Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 127 (2005), pp. 1222-1230.
- [3] Shigeta, M. and Murphy, A.B., “Thermal plasmas for nanofabrication”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 44, No. 17 (2011), pp. 174025 (16 pages).
- [4] Takana, H., Jang, J., Igawa, J., Nakajima, T., Solonenko, O.P., and Nishiyama, H., “Improvement of In-Flight Alumina Spheroidization Process Using a Small Power Argon

- DC–RF Hybrid Plasma Flow System by Helium Mixture”, J. Thermal Spray Tech., Vol. 20, No. 3 (2011), pp. 432-439.
- [5] Kawajiri, K., Sato, T., and Nishiyama, H., “Experimental analysis of a DC–RF hybrid plasma flow”, Surface Coatings Tech., Vol. 171 (2003), pp. 134-139.
- [6] Seo, J.H., Park, J.M., and Hong, S.H, “Influence of DC arc jets on flow fields analyzed by an integrated numerical model for a DC–RF hybrid plasma”, Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 17 (2008), pp. 025011 (10 pages).
- [7] Shigeta, M., “Three-dimensional flow dynamics of an argon RF plasma with DC jet assistance: a numerical study”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 1 (2013), pp. 015401 (12 pages).
- [8] Kobayashi, H., “Large eddy simulation of magnetohydrodynamic turbulent channel flows with local subgrid-scale model based on coherent structures”, Phys. Fluid, Vol. 18 (2006), pp. 045107 (11 pages)
- [9] Issa, R.I., “Silution of Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting”, J. Computational Phys., Vol. 62 (1985), pp. 40-65.